吡咯喹啉醌二钠对产蛋鸡生产性能、抗氧化状态和血浆生化指标的影响

王　晶　杨林林　张海军　武书庚　齐广海*

（中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点开放试验室，生物饲料开发国家工程研究中心，北京 100081)

摘　要：本试验通过研究不同剂量吡咯喹啉醌二钠（$PQQ\cdot Na_2$）对产蛋鸡生产性能、抗氧化状态和血浆生化指标的影响，旨在评价 $PQQ\cdot Na_2$ 在产蛋鸡上的生物学安全性。试验选用 540 只 25 周龄的健康海兰灰蛋鸡，随机分为 5 组，每组设 6 个重复，每个重复 18 只。5 组产蛋鸡分别饲喂添加 0（对照）、0.04、0.08、0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 及 200 mg/kg 维生素 E 的 5 种试验饲粮。预试期 1 周，正试期 24 周。结果表明：1）与对照组相比，饲粮添加 0.04~0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 对产蛋鸡的生产性能未产生显著影响（$P<0.05$）；2）试验第 24 周，与对照组相比，饲粮添加 0.04~0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 显著提高了鸡蛋的哈氏单位（$P<0.05$），且添加 0.08 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 还显著提高了蛋壳厚度（$P<0.05$）；3）与对照组相比，饲粮添加 0.08 和 0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 显著提高了血浆谷胱甘肽过氧化物酶（第 12 周）和总超氧化物歧化酶活性（第 2 周、第 24 周）（$P<0.05$）；4）与对照组相比，饲粮添加 0.08 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 显著降低了心脏羰基含量（$P<0.05$），显著提高了肝脏总抗氧化能力（$P<0.05$），且添加 0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 还显著降低了肝脏丙二醛含量（$P<0.05$）。上述试验结果提示，饲粮添加 0.08~0.12 mg/kg $PQQ\cdot Na_2$ 对产蛋鸡的生产性能无不良影响，且可改善机体抗氧化功能，综合考虑得出产蛋鸡饲粮中 $PQQ\cdot Na_2$ 的适宜添加量为 0.08 mg/kg。

关键词：吡咯喹啉醌二钠；产蛋鸡；抗氧化；血浆生化指标；蛋品质

中图分类号：S816.7　　　　文献标识码：　　　　文章编号：

收稿日期：2017-08-15

基金项目：国家蛋鸡产业技术体系项目（CARS-41-K13）；国家自然科学基金项目（31172212）

作者简介：王　晶（1984—），女，河南鹤壁人，博士研究生，从事家禽营养调控方面的研究。E-mail: wangjing@caas.cn

*通信作者：齐广海，研究员，博士生导师，E-mail: qiguanghai@caas.cn

生产实践中，产蛋鸡经常会遭受各种应激，造成机体的氧化还原状态失衡；此外，氧化应激也参与了多种致病性因素对鸡体的继发性损伤，从而影响鸡体的健康和生产表现以及蛋品质和安全。目前，饲粮中普遍使用的抗氧化剂，如2,6-二叔丁对甲酚、叔丁基羟基茴香醚等，仍然是以化学合成的抗氧化剂为主。安全、高效的天然抗氧化剂的开发和应用已成为家禽生产中的一个重要研究方向，对保障产蛋鸡健康和鸡蛋品质、实现蛋鸡的营养调控具有重要的意义。

吡咯喹啉醌（pyrroloquinoline quinone，PQQ）化学名称为4,5-二氢-4,5-二氧化-1-氢吡咯（2,3f）醌-2,7,9-三羧酸。PQQ是继烟酰胺和核黄素后于微生物中发现的又一种氧化还原酶辅酶，广泛存在于各种生物组织中。PQQ具有神经营养与保护、防治心脏和肝脏损伤、预防白内障、抗癌、消炎、防衰老等多种生物学功能。PQQ的上述功能多与其独特的抗氧化特性和对细胞信号通路激活作用有关。细胞和动物试验表明，PQQ对自由基所导致的氧化损伤，如四氯化碳致肝脏损伤[1]、辐射损伤[2]、缺氧/糖导致的心肌细胞凋亡[3]等，具有缓解和抑制损伤作用。脑损伤及神经退行性疾病与活性氧的过量产生有关，PQQ对神经系统的保护作用与其对活性氧的清除、缓和线粒体的氧化应激有关[4-5]。PQQ发挥抗氧化作用的可能机制有：1）提供电子使自由基还原，直接清除自由基；2）通过亲电子特性，与有害物质反应生成稳定的产物；3）激活信号通路诱导抗氧化酶产生，增强细胞对氧化应激的抵抗能力，保护组织免受氧化损伤[6]。在北美，PQQ作为一种天然抗氧化剂被批准成为膳食补充剂，而最为广泛应用的是其二钠盐形式——吡咯喹啉醌二钠（PQQ disodium，PQQ·Na_2）。本课题组近年来开展了多个PQQ·Na_2在蛋鸡生产上的研究，结果表明，PQQ·Na_2能缓解高能低蛋白质饲粮引起的脂质代谢和激素分泌紊乱，并可缓解生产性能下降[7]；氧化油应激状态下，PQQ·Na_2通过清除游离自由基，抑制脂质过氧化和增强机体抗氧化防御系统，防止肝脏损伤[6,8]。在脂肪变性和氧化应激肝细胞模型中，PQQ·Na_2通过减轻细胞内氧化应激，促进线粒体合成并维持其功能的方式提高细胞存活率，减少肝细胞脂肪变性或氧化应激损伤[9]。

此外，PQQ·Na_2可改善鸡蛋储藏期蛋清品质，延缓鸡蛋氧化速度，延长货架期。在人工增氧加热条件下，快速氧化时间与对照组相比推迟 115 min[10]。作为一种新型的抗氧化剂产品，有必要明确长期使用 PQQ·Na_2对靶动物生理状态和生产性能的影响。因此，本试验通过 24 周的生产试验观察饲粮添加 PQQ·Na_2对产蛋鸡生产性能、抗氧化状态的影响，同时观测血浆生化指标的变化，进而确定 PQQ·Na_2在产蛋鸡饲粮中适宜的添加量，以期为 PQQ·Na_2作为安全有效抗氧化剂在产蛋鸡生产中的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

PQQ·Na_2制剂由上海医学生命科学研究中心有限公司提供，为微生物发酵提纯，PQQ·Na_2含量为 1‰。

1.2 试验设计与试验饲粮

试验选用 540 只 25 周龄的健康海兰灰蛋鸡，随机分为 5 组，每组设 6 个重复，每个重复 18 只。每 3 只鸡 1 个笼位（45 cm×45 cm×45 cm）。经统计，各组间鸡只体重、产蛋率、平均蛋重等差异不显著（P>0.05）。预试期 1 周，正试期 24 周。在参照 NRC（1994）和 NY/T 33-2004 的基础上，结合《海兰灰产蛋鸡饲养手册》配制玉米-豆粕型基础饲粮，其组成及营养水平见表 1。在基础饲粮的基础上，配制添加 0、0.04、0.08、0.12 mg/kg PQQ·Na_2及 200 mg/kg 维生素 E 的 5 种试验饲粮。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　%

原料 Ingredients	含量 Content	营养水平 Nutrient levels2)	含量 Content
玉米 Corn	62.77	代谢能 ME/（MJ/kg）	11.16
大豆粕 Soybean meal	18.33	粗蛋白质 CP	16.6

棉籽粕 Cottonseed meal	3.00	赖氨酸 Lys	0.71
花生粕 Peanut cake	3.00	蛋氨酸 Met	0.32
鱼粉 Fish meal	2.00	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.54
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.40	苏氨酸 Thr	0.49
石粉 Limestone	8.00	色氨酸 Trp	0.18
预混料 Premix[1)]	1.00	钙 Ca	3.44
食盐 NaCl	0.30	有效磷 AP	0.33
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.10	维生素 E VE/(mg/kg)	8.08
沸石粉 Zeolite powder	0.10		
合计 Total	100.00		

[1)]每千克饲粮中含有 Contained the following per kg of the diet：VA 12 500 IU，VD_3 4 125 IU，VE 15 IU，VK 2 mg，VB_{12} 5 mg，生物素 biotin 0.2 mg，叶酸 folic acid 5 mg，烟酸 niacin 32.5 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 50 mg，吡哆醇 pyridoxine 8 mg，核黄素 riboflavin 8.5 mg，硫胺素 1.0 mg，Cu 8 mg，I 1.0 mg，Fe 60 mg，Mn 65 mg，Se 0.3 mg，Zn 66 mg。

[2)]营养水平值均为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.3 饲养管理

采用半开放式鸡舍 4 层立体笼养；自然光照加人工补光，光照时间为 16 h/d、光照强度 20 lx；相对湿度为 50%～90%；通风方式为自然通风结合纵向负压通风；温度控制在（22±3）℃；饲粮为干粉料，每天布料 2 次，匀料 4 次，自由采食和饮水；专人管理，每天捡蛋 2 次；每周带鸡消毒 1 次；每天清粪 2 次；常规防疫和免疫。

1.4 样品采集与指标测定

1.4.1 生产性能的测定

以重复为单位每天记录产蛋数、蛋重、死亡鸡数，每周记录耗料量，计算出各周和全期的产蛋率、平均日采食量、平均蛋重、料蛋比和死亡率。

1.4.2 蛋品质的测定

分别于试验的第 2、12 和 24 周末，每个重复采 10 枚蛋，用于测定蛋壳强度、蛋壳厚度、哈氏单位、蛋黄颜色。蛋黄颜色、哈氏单位采用鸡蛋品质测定仪（ORKA Food Technology Ltd.，以色列）测定；蛋壳厚度用蛋壳厚度测量计（ESTG-1，ORKA Food Technology Ltd.，以色列）测定；蛋壳强度用蛋壳强度分析仪（Egg Force Reader，ORKA Food Technology Ltd.，以色列）测定。

1.4.3 血浆和组织抗氧化指标的测定

于试验的第 2、12 和 24 周末，每组随机选取体重相近的产蛋鸡 2 只，空腹无菌翅静脉采血至肝素钠抗凝真空管，3 000 r/min 离心 10 min 制备血浆，-20 ℃保存，待测血浆抗氧化指标；在试验第 24 周末，每重复选取 1 只产蛋鸡屠宰，放血后，摘取心脏和肝脏，制备组织匀浆，备检心脏、肝脏抗氧化指标。

组织匀浆的制备：将肝脏或心脏用生理盐水冲洗，除去血液，滤纸吸干，称取 0.5 g，加 9 倍生理盐水，剪碎，置匀浆机中制成 10%的组织匀浆，3 000 r/min，离心 10 min，取上清液，-80 ℃保存待测。

采用黄嘌呤氧化酶法测定总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性，采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）含量，采用比色法测定谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性，采用二硝基苯肼法（5,5'-dithiobis-2-nitrobenzoic acid）测定羰基含量，采用铁离子还原/抗氧化力法测定总抗氧化力（T-AOC）。组织蛋白质含量采用二辛可酸（BCA）法测定。上述指标测定所用试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

1.4.4 血浆生化指标的测定

血浆谷草转氨酶（AST）、谷丙转氨酶（ALT）、碱性磷酸酶（ALP）活性和总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、总胆红素（TBIL）、肌酐（CRE）、尿酸（UA）含量均采用卓越 300 型全自动生化分析仪（上海科华）测定，试剂盒购自上海科华生物工程股份有限公司。

1.5　数据处理

采用 SPSS 16.0 统计软件的 one-way ANOVA 程序进行方差分析，并采用 Duncan 氏法进行组间的多重比较，以 $P<0.05$ 为差异显著性标准。结果以“平均值±标准差”表示。

2　结　果

2.1　饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对产蛋鸡生产性能和蛋品质的影响

饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ·Na$_2$ 或 200 mg/kg 维生素 E 对产蛋鸡试验各周（数据未显示）及全期（24 周，表 2）生产性能均未产生显著影响（$P>0.05$）。由表 3 可知，与对照组相比，第 24 周时各 PQQ·Na$_2$ 组和维生素 E 组的哈氏单位均显著提高（$P<0.05$），各 PQQ·Na$_2$ 组与维生素 E 组间无显著差异（$P>0.05$）；随饲粮 PQQ·Na$_2$ 添加量的增加，哈氏单位线性提高（$P=0.050$；结果未显示）。第 24 周时，与相比，0.04 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组蛋壳厚度较对照组和 0.12 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组显著升高（$P<0.05$），与维生素 E 组和 0.08 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组无显著差异（$P>0.05$）；饲粮 PQQ·Na$_2$ 添加量与蛋壳厚度呈二次曲线关系（$P=0.003$；结果未显示）。饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ·Na$_2$ 或 200 mg/kg 维生素 E 对蛋黄颜色和蛋壳强度均未产生显著影响（$P>0.05$）。

表 2　饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对产蛋鸡生产性能的影响（27~50 周龄）

Table 2　Effects of PQQ·Na$_2$ supplementation on performance of laying hens (27 to 50 weeks of age)

项目 Items	对照组 Control group	维生素 E 组 VE group	PQQ·Na$_2$ 组 PQQ·Na$_2$ groups			P 值 P-value
			0.04 mg/kg	0.08 mg/kg	0.12 mg/kg	
平均蛋重 AEW/g	62.29±1.39	61.76±1.19	62.18±0.80	62.21±0.58	61.98±0.74	0.888

平均日采食量 ADFI/g	130.0±3.06	128.6±6.15	130.1±3.53	129.1±2.56	129.4±3.32	0.962
产蛋率 Laying rate/%	83.56±3.74	86.86±6.18	86.31±4.95	87.13±4.13	81.35±4.42	0.190
料蛋比 Feed/egg	2.46±0.13	2.38±0.22	2.40±0.21	2.35±0.10	2.54±0.20	0.381
死亡率 Mortality rate/%	4.63±4.18	2.78±3.04	2.78±4.65	1.85±2.87	3.70±2.87	0.725

表 3　饲粮添加 $PQQ·Na_2$ 对产蛋鸡蛋品质的影响

Table 3　Effects of $PQQ·Na_2$ supplementation on egg quality of laying hens

项目 Items	对照组 Control group	维生素 E 组 VE group	$PQQ·Na_2$ 组 $PQQ·Na_2$ groups			*P* 值 *P*-value
			0.04 mg/kg	0.08 mg/kg	0.12 mg/kg	
哈氏单位 Haugh unit/U						
第 2 周 Week 2	77.71±3.95	76.63±2.93	77.75±1.78	75.84±2.03	74.89±3.76	0.428
第 12 周 Week 12	72.16±5.99	72.61±2.04	74.42±1.73	71.54±2.73	73.81±2.73	0.618
第 24 周 Week 24	70.06±2.53^{b}	75.62±1.58^{a}	73.98±2.54^{a}	75.72±2.98^{a}	74.16±4.10^{a}	0.014
蛋黄颜色 Yolk color						
第 2 周 Week 2	6.72±0.71	7.17±0.28	6.94±0.39	7.06±0.61	6.89±0.54	0.662
第 12 周 Week 12	6.56±0.40	6.39±0.57	6.94±0.39	6.89±0.72	6.67±0.42	0.338

第 24 周 Week 24	8.33±0.37	8.03±0.31	8.44±0.34	8.28±0.39	8.17±0.46	0.388
蛋壳厚度 Eggshell thickness/mm						
第 2 周 Week 2	0.343±0.010	0.338±0.008	0.333±0.008	0.334±0.007	0.337±0.007	0.272
第 12 周 Week 12	0.341±0.009	0.350±0.011	0.353±0.004	0.360±0.011	0.350±0.020	0.163
第 24 周 Week 24	0.345±0.017^{bc}	0.350±0.009^{abc}	0.359±0.003^{a}	0.357±0.010^{ab}	0.342±0.007^{c}	0.032
蛋壳强度 Eggshell strength/(N/cm^2)						
第 2 周 Week 2	38.41±2.74	41.86±2.78	38.98±3.33	42.80±3.62	40.86±1.90	0.075
第 12 周 Week 12	43.04±2.18	43.91±2.68	43.42±1.42	44.29±2.51	44.92±4.11	0.779
第 24 周 Week 24	38.81±2.30	39.26±1.39	40.71±2.36	41.17±1.72	39.32±1.73	0.187

同行数据肩标不同字母差异显著（P<0.05）。下表同。

Values in the same row with different letter superscripts differ significantly (P<0.05). The same as below.

2.2　饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对产蛋鸡血浆抗氧化指标的影响

饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对产蛋鸡血浆抗氧化指标的影响见表 4。血浆 T-AOC 方面，试验第 12 周时，各 PQQ·Na$_2$ 组均显著高于对照组（P＜0.05），同时 0.08 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组还显著高于维生素 E 组（P＜0.05）；试验第 24 周时，0.04 和 0.08 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组显著高于对照

组、维生素 E 组和 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组（P＜0.05）。血浆 T-SOD 活性方面，试验第 2 周时，0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组显著高于对照组和 0.04 mg/kg PQQ·Na_2 组（P＜0.05），与维生素 E 组无显著差异（P>0.05）；试验第 12 周时，0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组与维生素 E 组相比无显著差异，二者均显著高于其他各组（P＜0.05）；试验第 24 周时，0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组显著高于对照组（P＜0.05），0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组还显著高于维生素 E 组（P＜0.05）。血浆 GSH-Px 活性方面，试验第 2 周时，0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组和维生素 E 组显著高于对照组（P＜0.05）；试验第 12 周时，各 PQQ·Na_2 组和维生素 E 组均显著高于对照组（P＜0.05）；试验各采样时间点，各 PQQ·Na_2 组与维生素 E 组均无显著差异。饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ·Na_2 或 200 mg/kg 维生素 E 对血浆 MDA 含量均未产生显著影响（P>0.05）。

表 4 饲粮添加 PQQ·Na_2 对产蛋鸡血浆抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of PQQ·Na_2 supplementation on plasma antioxidant indices of laying hens

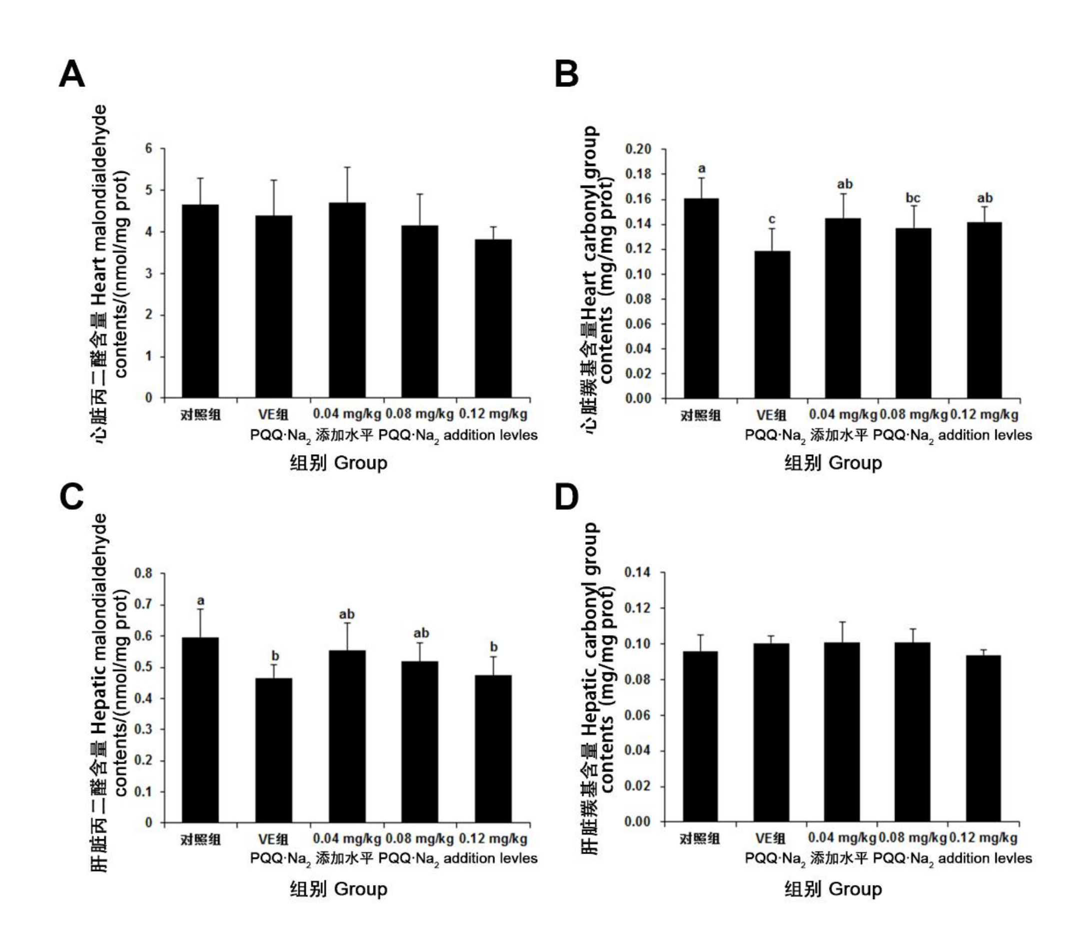
项目 Items	对照 Control group	维生素 E 组 VE group	PQQ·Na_2 组 PQQ·Na_2 groups			P 值 P-value
			0.04 mg/kg	0.08 mg/kg	0.12 mg/kg	
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)						
第 2 周 Week 2	4.01±0.98	6.01±1.66	5.01±1.26	5.90±1.23	5.92±1.48	0.077
第 12 周 Week 12	3.74±0.80^{c}	5.32±0.25^{b}	6.34±1.32^{ab}	6.83±0.83^{a}	5.84±0.84^{ab}	＜0.001
第 24 周 Week 24	3.90±1.71^{b}	4.38±0.68^{b}	8.69±1.40^{a}	8.65±1.93^{a}	5.47±1.48^{b}	＜0.001
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)						

第 2 周 Week 2	188.50±27.11^{b}	217.59±20.91^{ab}	204.69±20.10^{b}	239.92±30.47^{a}	250.18±26.95^{a}	0.003
第 12 周 Week 12	166.53±10.23^{b}	191.11±4.30^{a}	168.13±14.19^{b}	175.37±10.40^{b}	189.79±8.43^{a}	0.004
第 24 周 Week 24	168.44±12.77^{c}	189.41±15.27^{bc}	190.67±28.11^{bc}	211.02±24.49^{ab}	221.45±25.50^{a}	0.004
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)						
第 2 周 Week 2	485.81±191.32^{c}	628.03±55.24^{ab}	561.28±99.93^{bc}	691.14±52.55^{ab}	722.65±72.28^{a}	0.005
第 12 周 Week 12	584.35±61.70^{b}	662.82±20.01^{a}	698.90±60.61^{a}	681.13±51.44^{a}	698.20±25.41^{a}	0.002
第 24 周 Week 24	627.09±30.19	700.40±45.07	681.94±49.79	674.66±65.24	708.13±60.29	0.090
丙二醛 MDA/(nmol/mL)						
第 2 周 Week 2	4.44±0.99	3.80±0.65	4.56±0.70	4.15±0.56	3.65±0.63	0.213
第 12 周 Week 12	7.58±1.20	6.03±1.24	6.46±1.11	6.00±0.85	6.00±0.39	0.057
第 24 周 Week 24	10.77±1.06	8.87±1.34	9.84±1.35	9.18±1.40	8.99±1.25	0.092

2.3 饲粮添加 PQQ·Na_2 对产蛋鸡组织抗氧化指标的影响

由图 1 可知，随饲粮 PQQ·Na_2 添加量的增加，心脏（P=0.034；结果未显示）和肝脏（P=0.009；结果未显示）MDA 含量线性降低。与对照组相比，0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组心脏

和肝脏 MDA 含量分别降低 17.81%（*P*>0.05）和 21.67%（*P*<0.05）。各 PQQ·Na_2 组心脏和肝脏 MDA 含量与维生素 E 组无显著差异（*P*>0.05）。心脏羰基含量随饲粮 PQQ·Na_2 添加量的增加呈二次降低（*P*=0.031；结果未显示），0.08 mg/kg PQQ·Na_2 组较对照组显著降低（*P*<0.05）。饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ·Na_2 或 200 mg/kg 维生素 E 对肝脏羰基含量均未产生显著影响（*P*>0.05）。



数据柱上标不同字母表示差异显著（*P*<0.05）。

Value columns with different letters differ significantly (*P*<0.05).

图 1 饲粮添加 PQQ·Na_2 对产蛋鸡心脏 MDA 含量（A）、心脏羰基含量（B）、肝脏 MDA 含量（C）和肝脏羰基含量（D）的影响

Fig.1 Effects of PQQ·Na_2 supplementation on heart MDA content (A), heart carbonyl group

content (B), hepatic MDA content (C) and hepatic carbonyl group content (D) of laying hens

由表 5 可知，0.12 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组心脏 GSH-Px 活性显著高于对照组和维生素 E 组（P<0.05），同时还显著高于 0.04 和 0.08 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组（P<0.05）。与对照组相比，0.04 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组和维生素 E 组心脏 T-SOD 活性显著提高（P<0.05），但饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对心脏 T-AOC 无显著影响（P>0.05）。0.08 mg/kg PQQ·Na$_2$ 组肝脏 T-AOC 显著高于对照组（P<0.05），与维生素 E 组和其他 PQQ·Na$_2$ 组无显著差异（P>0.05）。饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对肝脏 T-SOD 活性无显著影响（P>0.05）。

表 5　饲粮添加 PQQ·Na$_2$ 对产蛋鸡心脏和肝脏抗氧化指标的影响

Table 5　Effects of PQQ·Na$_2$ supplementation on antioxidant indices in heart and liver of laying hens

项目 Items	对照组 Control group	维生素 E 组 VE group	PQQ·Na$_2$ 组 PQQ·Na$_2$ groups			*P* 值 *P*-value
			0.04 mg/kg	0.08 mg/kg	0.12 mg/kg	
心脏 Heart						
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	0.51±0.09	0.52±0.08	0.58±0.08	0.53±0.07	0.51±0.08	0.541
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	516.80±68.89^{c}	687.60±77.50^{a}	609.31±58.34^{ab}	543.59±44.97^{bc}	571.28±35.02^{bc}	<0.001
谷胱甘肽过氧化酶 GSH-Px/(U/mg prot)	5.81±0.61^{b}	5.50±1.15^{b}	6.08±0.83^{b}	6.30±0.47^{b}	7.86±0.70^{a}	<0.001
肝脏 Liver						
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	0.97±0.09^{b}	1.13±0.12^{a}	1.09±0.12^{ab}	1.18±0.10^{a}	1.08±0.08^{ab}	0.035
总超氧化物歧化酶	284.35±22.22	282.95±30.15	281.58±46.30	293.79±31.27	264.10±45.12	0.059

T-SOD/(U/mg prot)						
谷胱甘肽过氧化酶 GSH-Px(U/mg prot)	3.08±0.56	3.29±0.15	3.14±0.49	3.51±0.35	2.81±0.59	0.134

2.4　饲粮添加 PQQ·Na₂ 对产蛋鸡血浆生化指标的影响

饲粮添加 PQQ·Na₂ 2 周后，0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na₂ 组和维生素 E 组血浆 CRE 含量显著低于对照组（*P* <0.05）；此外，0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na₂ 组血浆 UA 含量也显著高于对照组（*P*<0.05）。试验第 12 周时，各 PQQ·Na₂ 组血浆 CRE 含量显著高于对照组（*P*<0.05），而与维生素 E 组无显著差异（*P*>0.05）。试验期第 24 周时，蛋鸡血浆 ALP 活性以及 ALB 和 UA 含量受到 PQQ·Na₂ 添加量的显著影响（*P*<0.05）。其中，各 PQQ·Na₂ 组血浆 ALP 活性显著低于对照组和维生素 E 组（*P*<0.05），但各 PQQ·Na₂ 组间无显著差异（*P*>0.05）；0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na₂ 组血浆 ALB 含量较对照组、维生素 E 组和 0.02 mg/kg PQQ·Na₂ 组显著升高（*P*<0.05）；0.12 mg/kg PQQ·Na₂ 组血浆 UA 含量显著高于其他各组（*P*<0.05）。

表 6　饲粮添加 PQQ·Na₂ 对产蛋鸡血浆生化指标的影响

Table 6　Effects of PQQ·Na₂ supplementation on plasma biochemical parameters of laying hens

项目 Items	对照组 Control group	维生素 E 组 VE group	PQQ·Na₂ 组 PQQ·Na₂ groups			*P* 值 *P*-value
			0.04 mg/kg	0.08 mg/kg	0.12 mg/kg	
第 2 周 Week 2						
谷草转氨酶 AST/(U/L)	201.33±24.91	209.67±25.92	209.5±20.58	211.83±25.06	208.67±13.98	0.941
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	20.00±5.15	28.20±6.02	25.67±4.89	26.00±5.93	27.40±9.34	0.310
碱性磷酸酶	689.50±211.00	608.80±225.13	614.80±164.84	612.83±139.00	515.80±78.23	0.606

ALP/(U/L)						
总蛋白 TP/(g/L)	43.97±9.25	45.34±9.46	44.42±6.16	43.92±2.58	44.64±6.74	0.998
白蛋白 ALB/(g/L)	20.13±6.11	18.82±2.00	20.2833±2.63	20.10±3.55	18.65±1.92	0.880
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	12.50±0.65	12.22±0.71	12.29±0.88	12.13±0.87	12.14±0.58	0.906
总胆红素 TBIL/(μmol/L)	2.75±1.48	2.92±1.40	2.50±1.10	2.80±0.73	2.15±0.67	0.793
肌酐 CRE/(μmol/L)	7.17±1.94[a]	5.5±1.76[b]	5.67±0.52[ab]	5.00±0.63[b]	4.83±0.75[b]	0.031
尿酸 UA/(μmol/L)	109.00±12.79[b]	129.60±29.75[ab]	127.67±23.56[ab]	155.40±11.63[a]	148.83±25.72[a]	0.021
第12周 Week 12						
谷草转氨酶 AST/(U/L)	220.50±26.07	211.33±29.64	212.50±13.52	221.00±32.07	205.33±27.65	0.833
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	3.50±1.38	4.00±0.63	3.50±1.05	3.17±0.98	3.83±1.17	0.699
碱性磷酸酶 ALP/(U/L)	1042.50±215.78	963.33±418.25	746.17±152.53	626.50±201.57	728.00±257.41	0.061
总蛋白 TP/(g/L)	43.17±3.13	44.83±3.31	45.33±3.39	43.50±3.39	44.80±3.27	0.750
白蛋白	15.17±0.75	15.50±0.84	15.83±1.47	15.00±1.10	16.50±1.87	0.293

ALB/(g/L)						
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	12.63±0.27	12.28±0.61	12.88±0.65	12.57±0.48	12.80±0.69	0.410
总胆红素 TBIL/(μmol/L)	2.67±0.84	2.87±0.18	3.35±0.39	3.17±0.23	3.18±0.46	0.133
肌酐 CRE/(μmol/L)	37.17±2.78^{b}	47.37±5.92^{a}	51.50±4.00^{a}	47.98±4.25^{a}	49.12±4.46^{a}	0.001
尿酸 UA/(μmol/L)	140.17±45.80	172.67±42.80	134.50±28.13	127.33±47.63	172.80±42.50	0.226
第 24 周 Week 24						
谷草转氨酶 AST/(U/L)	220.33±23.04	219.00±18.53	201.83±11.27	221.83±15.03	212.83±11.00	0.233
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	3.83±0.75	4.00±0.89	3.50±0.55	3.67±0.82	3.50±0.55	0.709
碱性磷酸酶 ALP/(U/L)	462.50±56.72^{a}	445.80±83.67^{a}	262.17±65.33^{b}	284.83±29.78^{b}	269.50±64.13^{b}	0.001
总蛋白 TP/(g/L)	52.80±4.76	51.00±4.47	53.50±7.01	51.67±4.50	53.33±3.56	0.887
白蛋白 ALB/(g/L)	42.17±0.75^{c}	42.83±0.98^{c}	45.17±1.72^{c}	57.33±2.81^{b}	91.20±4.49^{a}	0.001
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	12.18±0.74	12.33±0.79	12.53±1.07	12.50±0.56	12.18±1.32	0.941
总胆红素	2.98±0.33	3.68±0.48	3.42±0.49	3.40±0.38	3.42±0.42	0.114

TBIL/(μmol/L)						
肌　酐 CRE/(μmol/L)	22.12±6.55	19.68±4.48	21.80±6.43	22.95±6.35	21.48±5.86	0.911
尿　酸 UA/(μmol/L)	183.17±23.42[b]	183.50±20.74[b]	197.17±7.99[b]	193.60±13.01[b]	230.33±11.60[a]	0.001

3 讨 论

3.1 饲粮添加 $PQQ·Na_2$ 对产蛋鸡生产性能和蛋品质的影响

PQQ 是动物生长、发育和繁殖的必需营养因子。当小鼠采食缺乏 PQQ 的纯合饲粮时，可观察到小鼠生长迟缓、发育停滞、繁殖能力低下[11-13]。小鼠饲喂纯合饲粮时，添加 PQQ 对繁殖性能和生长发育具有改善作用；但当小鼠饲喂全价饲粮时，未观察到 PQQ 的营养作用[13]。本试验中，未观察到 PQQ 和维生素 E 对产蛋鸡试验全期生产性能产生显著影响。PQQ 是一种微量营养素，新生小鼠达到最佳生长状态所需饲粮 PQQ 含量≥300 ng/g[12]。食物中所含 PQQ 在 0.19～7.02 ng/g[14]。当饲喂小鼠全价饲粮时，可能即使不额外添加 PQQ，也不会造成 PQQ 缺乏。关于产蛋鸡 PQQ 的需要量和最佳供给量还未见报道。

生产者和消费者均十分关注鸡蛋的品质，但随蛋鸡周龄的增加，蛋清和蛋壳等蛋品质指标呈下降趋势。徐磊等[15]试验表明，饲粮添加 $PQQ·Na_2$ 6 周后有提高鸡蛋蛋清品质（蛋白高度和哈氏单位）的趋势，但未达到显著水平。本试验结果表明，饲粮添加 0.08～0.12 mg/kg $PQQ·Na_2$ 24 周后，能够显著改善产蛋后期（50 周龄）鸡蛋的哈氏单位。$PQQ·Na_2$ 对蛋清质量的改善作用可能与作用时间和剂量有关。卵黏蛋白占蛋清总蛋白的 1.5%～3.5%，其含量决定了鸡蛋蛋白的高度[16]。据报道，卵黏蛋白含量与输卵管膨大部的能量代谢率[17]和壳腺活性有关[18]。$PQQ·Na_2$ 对蛋清质量的改善作用有可能与其改善线粒体功能、促进能量代谢有关。PQQ 可通过多条细胞信号通路促进线粒体生物发生，改善细胞能量代谢[19-20]。此外，

蛋清品质也可能受到鸡蛋抗氧化状态的影响。研究表明，鸡蛋哈氏单位与蛋黄脂质氧化产物 MDA 的含量呈负相关[21]。而饲粮添加抗氧化剂能够提高鸡蛋的哈氏单位，降低鸡蛋储存期的脂质氧化产物含量[22]。本试验中，各 PQQ·Na_2 组蛋黄 MDA 含量均较对照组显著降低，T-AOC 则较对照组显著升高（数据未显示）。因此，PQQ·Na_2 对蛋清质量的改善作用有可能与其抗氧化特性有关。

3.2 饲粮添加 PQQ·Na_2 对产蛋鸡抗氧化状态的影响

MDA 和羰基是体内自由基攻击机体多不饱和脂肪酸和蛋白质所产生的脂质和蛋白质过氧化产物，是体内氧化损伤的特异性标志物。PQQ 具有亲电子特性，可与含羰基物质、邻苯二胺、亚硫酸盐和丙二腈等配合物反应生成稳定的产物[23]。本试验中，心脏和肝脏 MDA 含量随 PQQ·Na_2 添加量的增加线性降低，而羰基含量仅在心脏中表现出二次下降趋势，提示 PQQ 抗氧化特性的组织特异性。此外，PQQ 还可诱导抗氧化酶产生，增强细胞内氧化防御能力，从而减少氧化产物的生成。PQQ 能增加大肠杆菌细胞中抗氧化酶的表达[24]，提高甲基汞处理下神经细胞（PC12 细胞）中抗氧化酶的活性[25]。本课题组前期研究表明，PQQ 可通过刺激过氧化物酶体增生激活受体的共刺激因子-1α(pgc-1α)和 Nrf2-ARE 信号通路增加抗氧化酶活性，从而消除氧化油对蛋鸡的不利影响[6]。本试验中，饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ·Na_2 对产蛋鸡血浆、心脏和肝脏抗氧化酶的活性有不同程度的影响。可见，PQQ·Na_2 作为抗氧化剂能促进蛋鸡体内自由基的清除，使鸡体血液和组织的抗氧化能力有不同程度的改善。但不同器官组织中，对于不同抗氧化酶指标，PQQ·Na_2 的最佳添加量不一致。根据血浆中抗氧化酶活性和 MDA 含量，饲粮 PQQ·Na_2 的最佳添加量为 0.08～0.12 mg/kg；根据肝脏中抗氧化酶活性，饲粮 PQQ·Na_2 的最佳添加量为 0.08 mg/kg，添加量为 0.12 mg/kg 时组抗氧化酶活性有下降趋势。肝脏 MDA 含量随饲粮 PQQ·Na_2 添加量的增加线性降低，表明抗氧化酶活性降低有可能与 PQQ 的其他抗氧化机制有关，并非抑制作用。Akaike 等[26]报道，PQQ 能提供电子使自由基还原，直接清除自由基，其清除能力强于其他水溶性抗氧化剂（如维生素 C、谷胱甘肽、尿酸等）。因此，PQQ·Na_2 有可能通过非酶抗氧化系统发挥抗氧化作

用，对鸡体内抗氧化酶具有节省作用。

3.3　饲粮添加 PQQ·Na_2 对产蛋鸡血浆生化指标的影响

肝脏和肾脏分别是异源物质在机体进行转化和代谢的主要场所。血浆 AST、ALT、ALP 等酶类的活性能反映肝脏细胞受损情况及严重程度。ALT 和 AST 主要位于肝细胞胞浆水溶性部分或线粒体中，血液中这 2 种酶活性的升高常提示肝细胞破坏、细胞膜通透性增强或线粒体损伤。CRE 是肌肉中磷酸肌酸的终末代谢产物，不能被重吸收，经肾小球过滤后排出体外。血浆 CRE 含量变化反映了肾小球的滤过能力。UA 是家禽氨基酸代谢的终产物，反映了饲粮氨基酸的平衡及鸡只对蛋白质的利用程度。分析整个试验期内产蛋鸡血浆生化指标的变化情况分析，血浆 ALP 活性受饲粮 PQQ·Na_2 添加量的显著影响，并在各采样时间点变化趋势一致。饲粮 PQQ·Na_2 添加量对其他指标的影响仅在某一采样时间点达到显著水平，如试验初期（第 2 周）0.08 和 0.12 mg/kg 组血浆 CRE 含量显著低于对照组，在试验第 12 周时反而显著高于对照组；在试验第 2 周时 0.08 和 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组血浆 UA 含量较对照组显著升高，而在试验第 12 周时则与对照组无显著差异，而在试验第 24 周时 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 组又较对照组显著升高。上述血浆生化指标的不稳定变化表明 PQQ·Na_2 影响的暂时性，此外，鸡只个体阶段性变化也可能是造成血浆生化指标不稳定变化的原因之一。

ALP 是反映肝脏损伤、胆汁瘀滞的酶学指标，具有临床意义的是活性升高。此外，ALP 在生物体内的钙、磷代谢和骨组织中的沉积起着重要作用，与动物的生长发育密切相关。血浆 ALP 活性可间接反映来源于骨骼成骨细胞的 ALP 活性状况，且与骨骼矿物质沉积呈强的负相关关系[27]。本试验中，饲粮添加 0.04～0.12 mg/kg PQQ 降低了血浆 ALP 活性（第 24 周），有改善产蛋鸡后期蛋壳品质的作用。血浆中 ALP 活性和产蛋鸡血浆中钙离子浓度和骨骼强度呈负相关[28]，并且可能参与了蛋壳腺骨桥蛋白和壳基质蛋白 116 基因的表达[29]。但 ALP 活性的变化是否与 PQQ 调节蛋壳品质有关还需进一步研究。

4　结　论

① 饲粮添加 0.08~0.12 mg/kg PQQ·Na_2 对产蛋鸡生产性能和血浆主要生化指标无不良影响。

② 饲粮添加 0.04~0.12 mg/kg PQQ·Na_2 可改善产蛋鸡产蛋后期的蛋清质量和蛋壳质量，以添加量为 0.08 mg/kg 时效果最好。

③ 饲粮添加 0.04~0.12 mg/kg PQQ·Na_2 可改善产蛋鸡的血浆和组织抗氧化状态，以添加量为 0.08 和 0.12 mg/kg 效果较好。

④ 综合本试验测定结果得出，产蛋鸡饲粮中 PQQ·Na_2 适宜添加量为 0.08 mg/kg。

参考文献：

[1] TOSHIHIRO T,TOSHIFUMI Y,KIYOHIRO H,et al.The protective effect of pyrroloquinoline quinone and its derivatives against carbon tetrachloride-induced liver injury of rats[J].Journal of Gastroenterology and Hepatology,1993,8(4):342–347.

[2] XIONG X H,ZHAO Y,GE X,et al.Production and radioprotective effects of pyrroloquinoline quinone[J].International Journal of Molecular Science,2011,12(12):8913–8923.

[3] XU F,YU H X,LIU J Y,et al.Pyrroloquinoline quinone inhibits oxygen/glucose deprivation-induced apoptosis by activating the PI3K/AKT pathway in cardiomyocytes[J].Molecular and Cellular Biochemistry,2014,386(1/2):107–115.

[4] ZHANG Q,DING M,CAO Z,et al.Pyrroloquinoline quinine protects rat brain cortex against acute glutamate-induced neurotoxicity[J].Neurochemical Research,2013,38(8):1661–1671.

[5] ZHOU X Q,CHEN Q C,HU X D,et al.Pyrroloquinoline quinone prevents MK-801-induced stereotypical behavior and cognitive deficits in mice[J].Behavioural Brain Research,2014,258:153–159.

[6] 徐磊.日粮中添加吡咯喹啉醌对产蛋鸡生产性能和抗氧化机能的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2012:7–37.

[7] 赵芹,张海军,武书庚,等.吡咯喹啉醌对高能低蛋白质饲粮蛋鸡生产性能、蛋品质、血浆脂质代谢及抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2014,26(4):885–892.

[8] WANG J,ZHANG H J,XU L,et al.Dietary supplementation of pyrroloquinoline quinone disodium protects against oxidative stress and liver damage in laying hens fed an oxidized sunflower oil-added diet[J].Animal,2016,10(7):1129–1136.

[9] 赵芹,张海军,武书庚,等.吡咯喹啉醌对脂肪肝蛋鸡肝损伤的保护作用机制[J].动物营养学报,2014,26(4):651–658.

[10] 孙丽敏.吡咯喹啉醌钠(PQQ.Na_2)对蛋鸡生产性能和脂质代谢的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2015:16–17.

[11] KILLGORE J,SMIDT C,DUICH L,et al.Nutritional importance of pyrroloquinoline quinine[J].Science,1989,245(4920):850–852.

[12] STEINBERG F M,GERSHWIN M E,RUCKER R B.Dietary pyrroloquinoline quinone:growth and immune response in BALB/c Mice[J].Journal of Nutrition,1994,124(5):744–753.

[13] STEINBERG F M,STITES T E,ANDERSON P,et al.Pyrroloquinoline quinone improves growth and reproductive performance in mice fed chemically defined diets[J].Experimental Biology and Medicine,2003,228(2):160–166.

[14] NOJI N,NAKAMURA T,KITAHATA N,et al.Simple and sensitive method for pyrroloquinoline quinone (PQQ) analysis in various foods using liquid chromatography /electrospray-ionization tandem mass spectrometry[J].Journal of Agricultural Food and Chemistry,2007,55(18):7258–7263.

[15] 徐磊,张海军,武书庚,等.吡咯喹啉醌对蛋鸡生产性能、蛋品质及抗氧化功能的影响[J].动物营养学报,2011,23(8):1370–1377.

[16] TOUSSANT M J,LATSHAW J D.Ovomucin content and composition in chicken eggs with different interior quality[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,1999,79(12):1666–1670.

[17] RABIE M H,SZILÁGYI M,GIPPERT T.Effects of dietary *L*-carnitine on the performance and egg quality of laying hens from 65–73 weeks of age[J].British Journal of Nutrition,1997,78(4):615–623.

[18] AUSTIC R E.Role of the shell gland in determination of albumen quality[J].Poultry Science,1977,56(1):202–210.

[19] MUOIO D M,KOVES T R.Skeletal muscle adaptation to fatty acid depends on coordinated actions of the PPARs and PGC-1α:implications for metabolic disease[J].Applied Physiology,Nutrition,and Metabolism,2007,32(5):874–883.

[20] STITES T,STORMS D,BAUERLY K,et al.Pyrroloquinoline quinine modulates mitochondrial quantity and function in mice[J].Journal of Nutrition,2006,136(2):390–396.

[21] SAHIN K,AKDEMIR F,ORHAN C,et al.Effects of dietary resveratrol supplementation on egg production and antioxidant status[J].Poultry Science,2010,89(6):1190–1198.

[22] FRANCHINI A,SIRRI F,TALLARICO N,et al.Oxidative stability and sensory and functional properties of eggs from laying hens fed supranutritional doses of vitamins E and C[J].Poultry Science,2002,81(11):1744–1750.

[23] AIZENMAN E,HARTNETT K A,ZHONG C,et al.Interaction of the putative essential nutrient pyrroloquinoline quinone with the N-methyl-D-aspartate receptor redox modulatory site[J].The Journal of Neuroscience,1992,12(6):2362–2369.

[24] KHAIRNAR N P,MISRA H S,APTE S K.Pyrroloquinoline–quinone synthesized in Escherichia coli by pyrroloquinoline–quinone synthase of Deinococcus radiodurans plays a

role beyond mineral phosphate solubilization[J].Biochemical and Biophysical Research Communications,2003,312(2):303–308.

[25] ZHANG P,XU Y P,SUN J X,et al.Protection of pyrroloquinoline quinone against methylmercury-induced neurotoxicity via reducing oxidative stress[J].Free Radical Research,2009,43(3):224–233.

[26] AKAIKE T,SATO K,KOHNO M,et al.PQQ as a generator and a scavenger of oxygen radicals determination with ESR spectroscopy using a spin trap agent[C]//FUKUI T,KAGAMIYAMA H,SODA K,et al.Enzymes dependent on pyridoxal phosphate and other carbonyl compounds as confactors.New York:Pergamon Press,1991:511–513.

[27] 王凤来,张曼夫,陈清明,等.日粮磷和钙磷比例对小型猪(香猪)血清、肠、骨碱性磷酸酶及血清钙磷的影响[J].动物营养学报,2001,13(1):36–42.

[28] REICHMANN K G,CONNOR J K.Influence of dietary calcium and phosphorus on metabolism and production in laying hens[J].British Poultry Science,1977,18(6):633–640.

[29] 张亚男.饲粮锌对产蛋后期蛋鸡蛋壳品质及抗氧化机能的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2013:38–39.

Effects of Pyrroloquinoline Quinone Disodium Supplementation on Performance, Antioxidant Status and Plasma Biochemical Parameters of Laying Hens

WANG Jing YANG Linlin ZHANG Haijun WU Shugeng QI Guanghai[1*]

（*National Engineering Research Center of Biological Feed, Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, Feed Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*）

Abstract: The current study aimed to evaluate the biological safety of pyrroloquinoline quinone disodium (PQQ·Na_2) for laying hens and investigated the effects of dietary PQQ·Na_2 levels on

laying performance, egg quality, plasma biochemical parameters and antioxidant indices. (Method) Five hundred and forty 25-week-old Hyline Grey laying hens were randomly divided into 5 groups with each group consisted of 6 replicates of 18 birds each. The laying hens in the 5 groups were fed 5 experimental diets with 0, 0.04, 0.08, 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 and 200 mg/kg vitamin E, respectively. All hens were fed the diets for a 1-week adaptation followed by a 24-week trial period. The result showed as follows: 1) diet supplemented with 0.04 to 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 did not affect the performance of laying hens (P>0.05). 2) Compared with the control group, the Haugh unit was significantly increased by diet supplemented with 0.04 to 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 (P<0.05), and the eggshell thickness was significantly increased by diet supplemented with 0.8 mg/kg PQQ·Na_2 at the week 24 of trial (P<0.05). 3) Compared with the control group, the activities of plasma glutathion peroxidase (GSH-Px) (week 12) and total superoxide dismutase (T-SOD) (week 2 and 24) were significantly increased by diet supplemented with 0.08 and 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 (P<0.05). 4) Compared with the control group, diet supplemented with PQQ·Na_2 at 0.08 mg/kg significantly decreased the content of heart carbonyl group and significantly increased the hepatic total antioxidant capacity (T-AOC) (P<0.05), and diet supplemented with 0.12 mg/kg PQQ·Na_2 significantly decreased the hepatic malondialdehyde (MDA) content (P<0.05). Above results indicate that the supplementation of PQQ·Na_2 at 0.08 to 0.12 mg/kg in laying hens' diet do not have negative effects, but can enhance the laying hens' antioxidant function. The suitable supplemental level of PQQ·Na_2 in laying hens' diet is 0.08 mg/kg by comprehensive considering of the influence factors.

Key words: pyrroloquinoline quinone disodium; laying hens; antioxidant; plasma biochemical parameters; egg quality

*Corresponding author, professor, E-mail: qiguanghai@caas.cn （责任编辑　菅景颖）